

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1360 November 2019

UAVによる沿岸域の写真測量の精度の検討

川口 真吾
鈴木 高二朗
鶴田 修己
朝比 翔太

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

| | |
|----------------------------|----|
| 要 旨 | 3 |
| 1. はじめに | 4 |
| 2. UAVによる測量方法について | 5 |
| 2.1 GNSSについて | 5 |
| 2.2 使用機器 | 6 |
| 2.3 対象施設 | 6 |
| 2.4 計測手法 | 7 |
| 2.5 精度検証結果 | 8 |
| 2.6 まとめ | 11 |
| 3. 被災調査におけるUAV活用事例 | 12 |
| 3.1 台風1721号被災調査 | 12 |
| 3.2 台風1821号被災調査 | 18 |
| 4. まとめ | 22 |
| 謝辞 | 22 |
| 参考文献 | 22 |
| 付録1 赤外線カメラ搭載UAVによる調査 | 23 |

Examination of accuracy of photogrammetry of coastal area by UAV

Shingo KAWAGUCHI*

Kojiro SUZUKI**

Naoki TSURUTA*

Shota ASAHI*

Synopsis

Unmanned aerial vehicles based on rotary wings (multi-rotor), namely the so-called UAV have been widely spread in recent years. They are expected to be applied to surveys on the coastal and port structures for more enhancement of quickness, reasonability, safety and accuracy in the surveys. As a typical example with targeting a detached breakwater, the UAV-based survey can cut landing on the breakwater by a ship to promptly grasp the detailed positions of the structures. However, in order to achieve it, highly precise positioning-data of the UAV and a highly accurate photogrammetry method, which are insufficiently studied in the coastal and port engineering field, are required. To resolve the problem, this study examines the survey methods in disaster area.

Firstly, the GNSS systems on UAV are compared. It is shown that surveying with single-positioning GNSS system mounting on a UAV has about 30m error. And it can be suppressed with 0.174m error by GCP (Grand Control Point) corrections within the image analysis. Moreover, by using UAV with RTK-GNSS and PPK-GNSS systems, the error are further suppressed with 2.1cm and 8.9m, respectively. This implies that the UAV with highly-accurate GNSS systems can cut the landing surveys on the target breakwater.

Second, as a practical trial of the UAV-based survey in the disaster area, the Port and Airport Research Institute is targeted. This location had a damage by high waves and a high-tide due to a typhoon in 2017. From the traces of the inundation in the photos, the detailed inundation height and depth are spatially estimated. Moreover, additional practical UAV-based survey is conducted with targeting Kobe city including a large container terminal, which was damaged by a typhoon in 2018. Considering the result, the practical operation method and important notice for UAV-based survey are examined.

Key Words: UAV, Wave dissipating block, Typhoon, High tide, high wave, Survey

* Researcher, Maritime Structures Group, Coastal and Ocean Engineering Department

** Head, Maritime Structures Group, Coastal and Ocean Engineering Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5043 Fax : +81-46-842-7846 e-mail: kawaguchi-s84zh@p.mpat.go.jp

UAV による沿岸域の写真測量の精度の検討

川口 真吾*・鈴木 高二郎**・鶴田 修己***・朝比 翔太*

要 旨

回転翼型(マルチローター) UAV は、その操作性の容易さから近年では急速に普及が進んでいる。そうした中、UAV の沿岸域測量への活用から測量技術・運用の革新が期待されており、例えば、船舶を使用しなければ測量が実施できなかった島防波堤の測量や、被災地における迅速な被災状況把握がその一例として挙げられる。しかし、実際に UAV による島防波堤の測量を行うためには、高精度な写真測量方法の確立が必要であり、その検討は未だ十分ではない。そこで本研究では、被災地における UAV を活用した調査方法の検討を実施し、その結果、以下の事を明らかにした。

まず、写真測量方法について4種類の方法について検討を実施した。第一に、従来の単独測位 UAV を用いて撮影写真の解析から3次元測量を実施した。これは護岸と防波堤の各測量対象ともに標高誤差が顕著で、最大 30m 程度の誤差が確認された。一方、単独測位 UAV による空撮に対して適切な GCP 補正が実施可能となる条件下では、最大誤差が 0.174m に抑えられた。さらに、RTK-GNSS システム搭載型 UAV および PPK-GNSS システム搭載型 UAV を用いて防波堤を対象に検証を行い、各々で最大誤差 0.021cm, 0.089cm の高い測量精度が確認された。高精度な GNSS システムを搭載したこれら UAV の測量結果は、島防波堤の精密な測量が上陸なしに可能となることを示唆している。

次に、実際の被災現場への適用例として、RTK-GNSS システム搭載型 UAV を用いた写真測量により台風 1721 号で浸水した港湾空港技術研究所構内の浸水高を推定した。写真に残された痕跡と UAV による写真測量から、標高 2.6m の浸水高と構内最大浸水深 0.3m という定量的なデータを、被害発生から時間が経過した状況下で網羅的に取得し、これまで実施が困難であった高潮・高波時の浸水域、さらには公称値と異なる実際の地盤高についても、面的な把握が同時に可能となることを示した。これらの検討結果を踏まえ、台風 1821 号で浸水の被害があった神戸市において、UAV を用いた被災調査を実施するとともに、時間の限られた調査現場における UAV の運用方法について検討を実施した。

キーワード：RTK-GNSS 搭載型 UAV，測量，台風 1721 号，台風 1821 号，消波ブロック，高潮・高波

* 海洋研究領域 耐波研究グループ研究員

** 海洋研究領域 耐波研究グループ長

*** 海洋研究領域 耐波研究グループ研究官

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5043 Fax：046-842-7846 e-mail:kawaguchi-s84zh@p.mpat.go.jp

1. はじめに

近年、回転翼（マルチローター）の小型無人航空機いわゆるUAV（Unmanned Aerial Vehicle）の普及に伴い、UAVを用いた測量技術、構造物の維持管理技術の開発・運用が広く進められている。例えば、台風などの災害発生時には、被害状況の迅速な把握のためUAVを用いて上空からの撮影写真を速報データとして取得するなど役立てられている。これまでの消波ブロック等を含む港湾構造物の点検も、港湾施設の点検ガイドラインによる目視による実施とその定性的な評価が主となっており、詳細点検を行う場合には、従来は写真-1.1のように測量士が消波ブロックに直接上って測量を実施するなど、危険と時間を伴っていた。もしUAVを用いることで、詳細な三次元点群データが入手可能となれば、観測者の主観に依らない迅速かつ安全な点検が実施できる可能性がある。

UAVによる詳細な写真測量を被災構造物に対して行う場合は、従来、現地に地上基準点（GCP：Ground Control Point）を設けてその測量を行い、GCPの座標と画像を組み合わせることで画像解析をすることで構造物の座標を求めることが一般的である。しかし、島防波堤のように、船舶を用いて上陸しなければGCPの測量が実施できない港湾構造物に対しては、災害直後などの上陸に危険が伴う状況下では測量実施が困難となる。このGCPの測量を省略することができれば、災害調査・維持管理においてUAVを用いて事故やコストを削減しつつ、素早い対応が可能になるものと期待される。特に現在では、GCPの測量を別途行わずとも正確な写真測量が可能であるとされるUAV（RTK-GNSS搭載型UAV、PPK-GNSS搭載型UAV）が安価に取得可能となり始め、その活用が期待されるところである。

また、UAVは小型軽量である機種が数多く存在し、小回りが利きやすく災害現場などにおいて活躍が期待されている。浸水範囲や海岸・港湾構造物の被災状況、港湾域での車両、コンテナの散乱状況、砂浜の浸食状況などを広範囲に調査できるという点でUAVの有用性が高くなってきている。しかしながら、定量的な情報は浸水面積など面的な情報にとどまっている場合が多く、浸水深などの高さ情報を



写真-1.1 消波ブロックの沈下量調査

取得している例は少なかった。そして、前述と同様に被災現場において調査可能な範囲・時間が限られている場合が多い。特に港湾の制限区域では調査時間が限られており、GCPを網羅的に取得することは現実的でない。そのため、現場ではGCPを取得せずに高さ情報を取得できるUAVによる測量手法が求められていた。

以上のことから、本研究では島防波堤・消波ブロックで形成されている構造物のように人が近づきにくい港湾構造物の定量的な評価と、より迅速で正確な被災調査に向けて、RTK-GNSS搭載型UAV、PPK-GNSS搭載型UAVなど最新のUAVを用いて、UAVによる沿岸域の測量精度を明らかにすることを目的とした。

2. UAVによる測量方法について

現在, UAV を用いた代表的な測量方法として次の2種類が挙げられる。一つは, UAV によるレーザー測量であり, UAV から測量対象にレーザーを照射し, その反射光を解析し三次元点群データを取得する。もう一方の方法では, UAV から測量対象を写真撮影し, 画像解析 (SfM) を介して三次元点群データを取得する。UAV によるレーザー測量は, 水を透過するレーザーや草木の葉の間からレーザーを透過・反射させることで, 写真測量では適用が困難な場所についても容易に測量を行うことが可能な利点を有する。一方の写真測量では, レーザー測量では捕捉出来ない色の判別が可能であり, 測量対象の状況が視覚的により識別しやすい。各問題点としては, レーザー測量は高価であることと, 色の捕捉が出来ないことが挙げられ, 写真測量は天候, 特に太陽光と, 雲の影響を受けやすいことが挙げられる。本研究では, 現時点において経済的に導入が容易である写真測量を対象に, 測量精度の検討を実施した。

UAVによる写真測量の測量精度に関わる主な三要素として, カメラ性能 (画素数等), 画像解析 (SfM) ソフトウェアの性能, UAVが搭載しているGNSSの測位精度が挙げられる。その他, 天候も写真測量の精度に影響を及ぼす。カメラ性能については, 公共測量マニュアル (平成29年3月改訂) にて1画素につき1cm²の解像度が求められている。画像解析 (SfM) ソフトウェアについては, 本研究ではMetashape (旧PhotoScan) を使用した。本ソフトウェアは, 本研究での検証開始時点からも継続的にバージョンアップが行われており, 本研究では平成30年時点での解析結果であることに留意されたい。なお, 画像解析におけるSfM (Structure from Motion) とは, 測量対象を複数枚撮影して解析を行い, 撮影時点での機体の撮影位置と姿勢の推定を基に, 画像特徴点の三次元分布を推定して三次元点群データを取得し, 三

次元形状の復元を行うことである。このSfM処理時に座標値を入力することで, 三次元点群データに緯度経度標高の座標値が付与される。座標値入力では, UAVに搭載されたGNSSシステムによる座標値を使用する他, 測量対象地点にGCP (Ground Control Point) を設置して座標値を別途取得し, 画像解析時に追加入力することで三次元点群データの座標値を高精度化することも可能である。これら取得座標値の精度は, 三次元点群データに付与される座標精度に直接影響を及ぼすものであり, 画像解析ソフトウェアの性能評価において前提となるべき基本データである。カメラ性能の検証については, 前述の通り公共測量マニュアルで一定の必要基準が定められていることから, 本研究では, この取得座標値の精度がUAVによる写真測量に及ぼす影響を評価した。

2.1 GNSSについて

UAVに搭載されるGNSS受信機は単独測位方式が採用されていることが一般的であり, 数mレベルの誤差を伴う。これにより写真測量 (三次元点群データへの座標値付与) の精度が著しく低下するため, 従来では測量対象周囲の座標値を別途GCP測量によって取得していた。しかし近年では, 高精度GNSS受信機であるRTK-GNSSを直接搭載したUAVが汎用品としても登場しており, GCP測量による捕捉作業を省略できる可能性が出てきている。GNSSとはGlobal Navigation Satellite System (全球測位衛星システム) の略称であり, GPS, GLONASS, Galileo, 準天頂衛星 (QZSS) 等がその代表例である。地上の計測者側で用意した受信機から, 各衛星を介して緯度経度標高の座標値を得られるシステムであるが, その受信方式に基づいて座標値の精度は決定される (図-2.1.1)。一般に最も普及している方式は単独測位方式であり, 1機の受信機に4基以上の衛星電波を受信して測位を行う簡易な手法であるが, 数m程度の誤差が

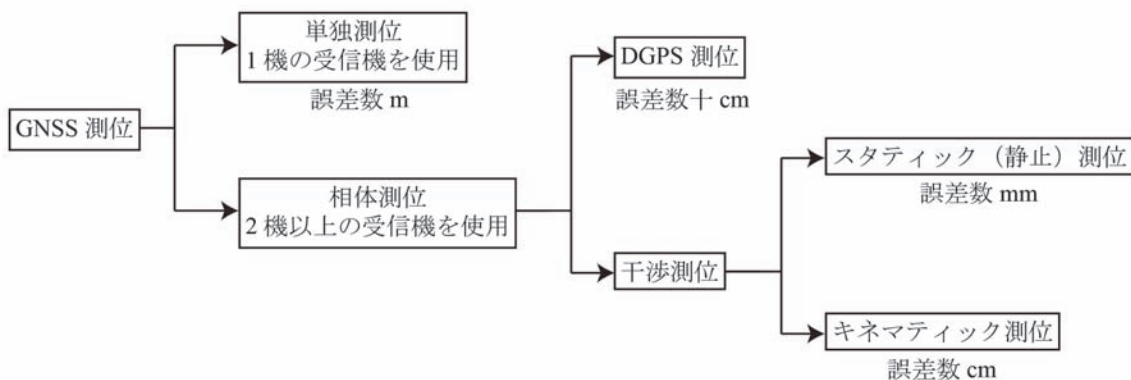


図-2.1.1 GNSS 系統図

生じる問題を含んでいる。一方、相対測位は2機以上の受信機を使用して測位することを言い、その方式の一つである干渉測位に属するキネマティック測位が本研究で行ったGCP測量及び後述のRTK及びPPKシステムに該当する。干渉測位とは、基準点と既知点で相互に通信をし、2機以上の受信機を使用して衛星受信データを解析することで誤差要因を消去し、補正を行う方式のことである。キネマティック測位はスタティック（静止）測位が1点を30～60分かけて測位するのに対して、移動しながら行える利便性の高い方式である。精度においてはスタティック測位に劣るものの、1点につき数十秒間で測位を完了させることが可能である。本研究で用いた、RTK-GNSSとPPK-GNSSはキネマティック測位方式に分類され、RTKはリアルタイムキネマティックを指し、測量時にリアルタイムで補正を行う。PPKは配信会社から送付される補正情報を使用して測量後に座標の補正を行う後処理キネマティック手法である。両者の利点として、後に詳述するがインターネットや衛星通信などの通信状況に左右されず、安定的に測量を実施する選択が可能である。

2.2 使用機器

RTK測位、PPK測位が可能な機体としてそれぞれPhantom4 RTK（写真-2.2.1、表-2.2.1）とKLAU PPKシステム搭載のInspire2（写真-2.2.2、表-2.2.2）を使用した。Phantom4 RTKは2種類の方式でRTK測位を行える。一つはVRS（仮想基準点）方式で、インターネットと接続することで電子基準点を利用した補正情報を配信会社から取得できる。もう一つはD-RTK2（地上基地局）を使用した方式で、地上に設置したD-RTK2との相対距離からD-RTK2にリンクしたUAVの本体位置を取得することができる。この方式では、D-RTK2に対して事前に取得したD-RTK2の座標値を入力する必要があるが、測量中はUAVとの接続状況のみを必要とするため、インターネットや衛星との接続状況に左右されず安定した測量が可能である。本研究では、このD-RTK2を使用して検証を実施した。また、検証例として単独測位方式のPhantom4 Proを使用した写真測量も併せて実施した。なお、Phantom4 ProはRTK測位機能を除いてPhantom4 RTKと同様の仕様である。参照データとしては、地上の複数の検証点においてRTK-GNSS受信機（表-2.2.3）を使用したGCPの測量による高精度な座標値を取得した。

2.3 対象施設

本研究では、神奈川県横須賀市長瀬にある港湾空港技術研究所の護岸（写真-2.3.1）と高知県高知港沖防波堤（写真-2.3.2）を対象に測量を実施し、それぞれ構造の異なる



写真-2.2.1 Phantom4 RTK

表-2.2.1 Phantom4 RTK仕様

| Phantom4 RTK | |
|--------------|-------|
| 重量 | 1391g |
| 最大上昇速度 | 5m/s |
| 最大下降速度 | 3m/s |
| 最大速度 | 16m/s |
| 最大飛行時間 | 30分 |



写真-2.2.2 KLAU PPKシステム搭載のInspire2

表-2.2.2 Inspire2仕様

| Inspire2 | |
|----------|-------|
| 重量（本体のみ） | 3440g |
| 最大上昇速度 | 5m/s |
| 最大下降速度 | 4m/s |
| 最大速度 | 26m/s |
| 最大飛行時間 | 27分 |

表-2.2.3 RTK-GNSS受信機仕様

| Hiper SR | |
|----------|-------------------------|
| 精度(RTK) | 水平(10mm+1.0ppm×D)m.s.e. |
| D: 測定距離 | 垂直(15mm+1.0ppm×D)m.s.e |

港湾構造物を対象に各計測方法の精度を検証した。なお、護岸は陸に面するためGCPの測量が常時可能であるが、島防波堤は海上にあるためGCPの測量には船舶による防波堤への上陸が前提となり、台風など災害直後の波が高い条件下では実施が困難な環境である。本研究で調査対象施設として選定した高知港防波堤は、桂浜防波堤、防波堤（南）、防波堤（東第一）から成り、島防波堤である防波堤（南）、防波堤（東第一）を測量対象とした。

2.4 測量手法

(1)画像解析 (SfM)

UAVによって得られた対象施設の空撮写真と、RTK-GNSS測位で得られたGCPの位置情報から画像解析(SfM)を行いDEM(数値標高モデル)、オルソ画像を作成する。DEMは標高のメッシュデータのことである。画像解析ソフトウェアはAgisoft社のMetashape(旧PhotoScan)を用いた。画像解析(表-2.4.1, 図-2.4.1)は以下の4種類の方法で行った。①Phantom4 proの単独測位GNSSの位置情報のみで画像解析を行った場合、②画像解析時にGCPの位置情報を追加した場合、③Phantom4 RTKによる撮影写真を使った場合、④KLAU PPKシステムによる補正済座標データが埋め込まれた写真を用いた場合、の4種類である。計測実施後、各手法における同一位置での断面図及び検証点でのGNSS測量結果と比較することで三次元点群データの精度

検証を実施した。

(2)自動飛行

UAVによる写真測量では、撮影写真毎の撮影範囲の重複率を一定に保つことが重要であるが、撮影範囲が広範囲に



写真-2.3.1 港湾空港技術研究所護岸



写真-2.3.2 高知港防波堤

表-2.4.1 本研究での測量方法

| 測量方法 | GCP 補正 | キネマティック測位 | 備考 | 機材 |
|-----------------------|--------|-----------|----------|----------------------|
| ①単独測位型 UAV | × | × | | Phantom4 pro |
| ②単独測位型 UAV + GCP 追加補正 | ○ | × | 追加測量の実施 | Phantom4 pro + GCP |
| ③RTK 型 UAV | × | ○ | リアルタイム補正 | Phantom4 RTK |
| ④従来 UAV + PPK システム | × | ○ | 後処理補正 | KLAU PPK on Inspire2 |

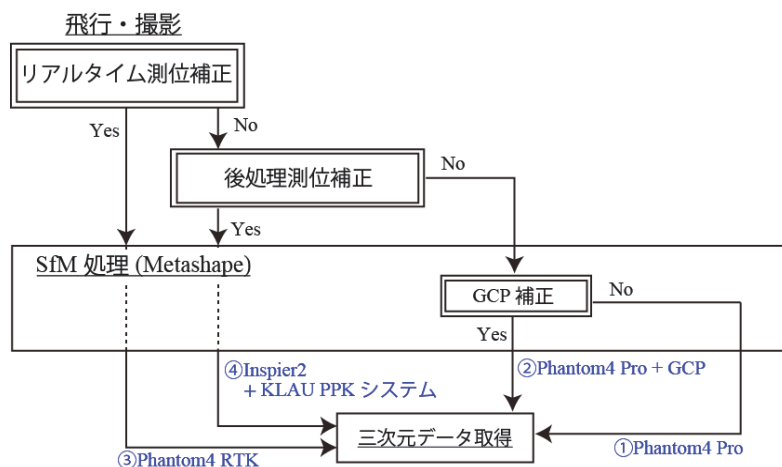


図-2.4.1 画像解析フロー図

表-2.5.1 撮影諸元

| システム | 対象施設 | 撮影枚数 | 撮影時間(分) | 解析時間(分) |
|----------------------|-----------|------|---------|---------|
| ①Phantom4 Pro | 護岸 | 613 | 40 | 120 |
| | 防波堤 (南) | 373 | 30 | 110 |
| ②Phantom4 Pro + GCP | 護岸 | 635 | 40 | 240 |
| | 防波堤 (南) | 269 | 30 | 52 |
| ③Phantom4 RTK | 護岸 | 338 | 30 | 160 |
| | 防波堤 (南) | 202 | 30 | 240 |
| | 防波堤 (東第一) | 272 | 30 | 190 |
| ④Inspire2 + KLAU PPK | 防波堤 (東第一) | 192 | 30 | 90 |

渡る場合、手動飛行では一定の重複率を正確に保ち続けることは困難である。そのため本研究では、自動航行アプリを使用して、UAVの飛行及び撮影の制御を行った。自動航行アプリは、Phantom4 proにはPix4D (Pix4D社)、Phantom4 RTKにはGS RTK (DJI社)をそれぞれ用いた。自動航行アプリの使用は、一定の重複率を維持できるだけでなく、大まかな調査時間や使用バッテリー数が事前に把握でき、調査計画を立てやすくなる利点を有している。また、操縦者の操縦技能によって測量精度が左右されにくく、安定的な測量が可能となる。

2.5 精度検証結果

高知港沖防波堤での測量精度の検証は、現地での測量可能時間の都合から、防波堤 (東第一) ではPhantom4 RTKとKLAU PPKシステム搭載のInspire2の比較検証を実施し、防波堤 (南) ではPhantom4 Pro, Phantom4 Pro + GCP, Phantom4 RTKの3手法の比較検証を実施した。

① Phantom4 Pro (単独測位UAV) による測量

表-2.5.1 に全ケースの撮影諸元を記す。Phantom4 pro で撮影した写真を画像解析し作成したオルソ画像を図-2.5.1 に、また、その任意断面における標高分布を図-2.5.2 に示す。図-2.5.3 では、別途計測した検証点の計測標高値と三次元点群データ (DEM) からの抽出値を示す。なお、抽出した断面は図-2.5.1 中の黄色矢印線上を対象とした。図を見ると、単独測位 UAV による測量断面では、高さ方向に 15m 以上の非常に大きな誤差が生じていることが確認できる。また、全域にわたって 3D モデルが傾斜する傾向にあることが窺える。これは、カメラのレンズに固有の歪み (パラメータ) が存在していることが一因と考えられ、本研究で用いた SfM ソフトウェア上ではその修正処理が施されているものの、完全な解決には至っていない。他の解決策としては、次項で示すように GCP を設け、SfM ソフトウェア

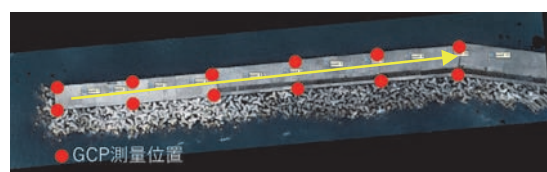


図-2.5.1 オルソ画像 (上: 護岸, 下: 防波堤 (南))

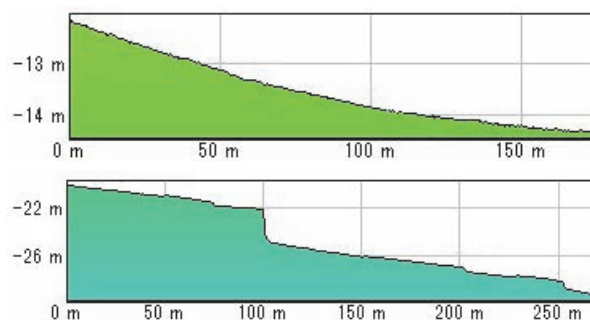


図-2.5.2 単独測位 UAV による測量断面図
(上: 護岸, 下: 防波堤 (南))

上で捕捉データとして座標値を入力することが考えられる。他には、撮影時に撮影角度を固定せず、変化させながら撮影することも一般的に重要と言われている。

② Phantom4 Pro + GCP (単独測位 UAV + GCP) による測量

本測量手法では、①と同様の機材を用いて撮影を実施したが、画像解析において護岸で 21 点、防波堤で 12 点の GCP 取得・補正を行った。なお、GCP 計測データの取得時間は

研究所で約1時間、防波堤（南）で約1時間を要した。それに加えて、画像解析時には三次元点群データ上にGCPを手動で設定・入力する必要があるため、通常の解析とは別に当該作業の時間が必要となった。ここでは、GCPの設定数がどの程度精度に影響を及ぼすかを比較するため、GCPの設定を3点のみに限定した場合の解析結果も併せて作成した。先述の解析地形のドーム状変形への対策には、自動飛行を行う際に撮影角度は俯角80度を基準として前後へ10度程度変化し続けるようにカメラのジンバルを振りながら撮影を実施した。図-2.5.4に前節と同様の任意断面における標高分布を、図-2.5.5に別途計測したGCPの計測標高値と三次元点群データ（DEM）からの抽出値をそれぞれ示す。図-2.5.3と図-2.5.5の高知港防波堤（南）での測量結果を比較すると、測量誤差が図-2.5.5で劇的に改善されていることが確認できる。護岸の場合は補正に使用したGCPが3点のみ（図-2.5.5）であったため改善は限定的であったものの、GCPを設定しないケースと比較すると、精度が明らかに向上した。このGCPを21点に増加させた場合、測量精度は更に向上した（図-2.5.5）。

③ Phantom4 RTKによる測量

前項と同様に、Phantom4 RTKを用いて護岸および防波堤を対象に測量を行い、さらに防波堤（東第一）においても測量を行った。測量手順としては、基準局として陸上から

アクセスできる桂浜防波堤にD-RTK2を設置し、当該位置における正確な座標値をGNSS測量により計測してD-RTK2へ入力した。UAVは桂浜防波堤から離陸させ、自動飛行によって撮影を実施した。なお、Phantom4 RTKでは使用カメラの固有パラメータが開示されているため、画像解析時には、固有パラメータを直接手入力した。本測量実験の他のケース①、②、④では、各機体に搭載される使用カメラの固有パラメータが不明であったため、画像解析ソフトウェアに搭載される自動判別機能により固有パラメータ

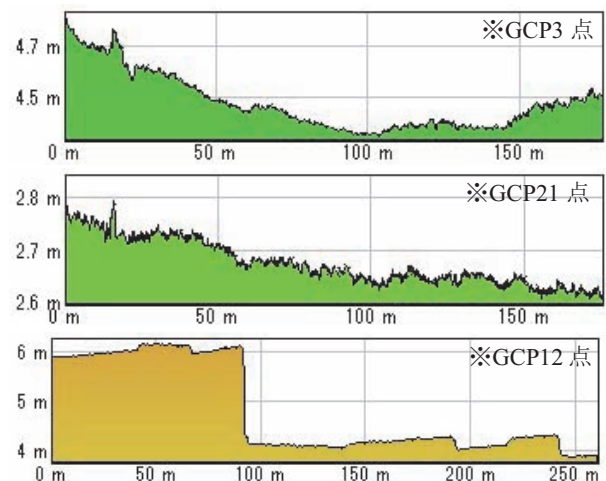


図-2.5.4 単独測位 UAV + GCP による断面図
(上中：護岸，下：防波堤（南）)

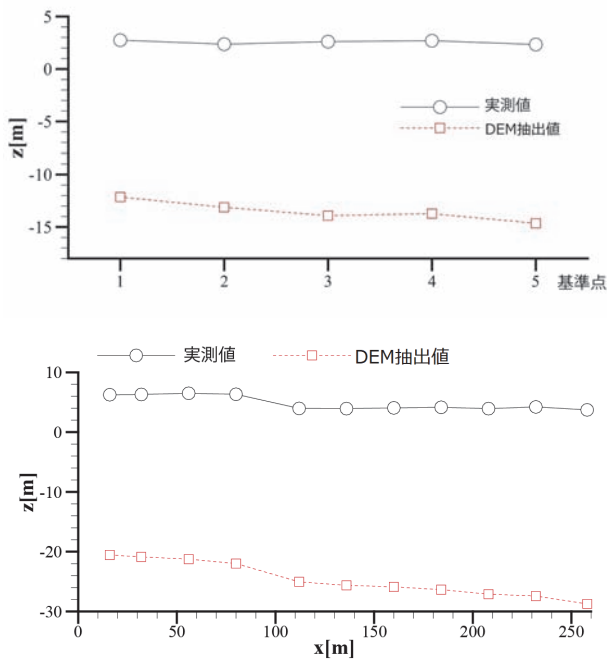


図-2.5.3 単独測位 UAV での作成モデル抽出値と GCP 実測値による標高値（上：護岸，下：防波堤（南））

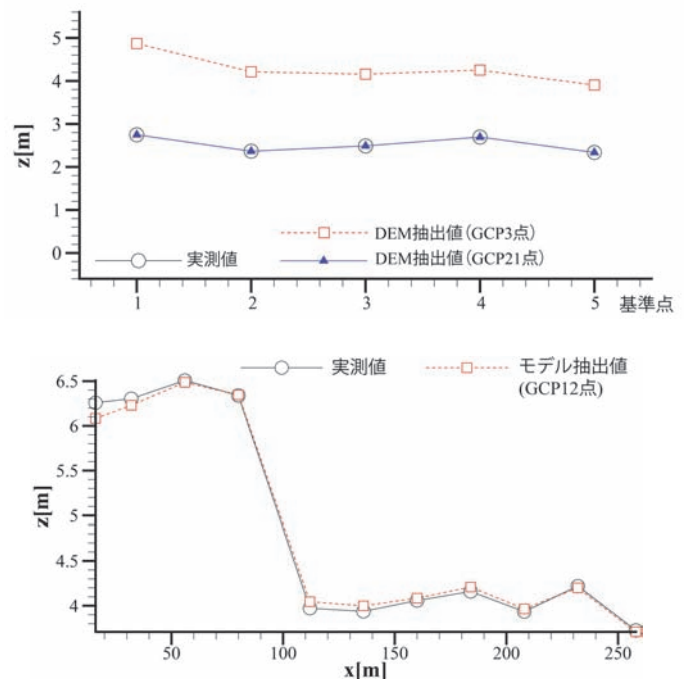


図-2.5.5 単独測位 UAV+GCP での作成モデル抽出値と GCP 実測値による標高値（上：護岸，下：防波堤（南））

タを設定した。また、従来の Phantom4 Pro とは異なり、本機体ではカメラの露出設定も手動で変更が可能であったため、日照などの天候状況に合わせてより適切な設定となるように、フライト毎にカメラの設定を変更した (ISO : 100 ~ 400, F 値 (レンズ絞り) : 4 以上, シャッタースピード : 1000 程度, EV (画像の明るさ) : 0 ~ 0.3)。また、使用アプリの推奨設定に合わせて、カメラは俯角 60° に固定して撮影を実施した。そのため、護岸において空撮範囲がケース①, ②よりも 30m ほど狭くなっている。図-2.5.6 に前節と同様の任意断面における標高分布を、図-2.5.7 に別途計測した GCP の計測標高値と三次元点群データ (DEM) からの抽出値をそれぞれ示す。図から、護岸を対象とした場合はケース②で十分な数の GCP 捕捉を行った場合と同様に高い精度を示すことが確認できる。誤差の改善具合をより明瞭にするため、図-2.5.8 に防波堤 (南) 測量時の②単独測位 + GCP との誤差の比較を示す。最大誤差はケース②の場合に 0.174m あるが、ケース③の場合には 0.07m であり、誤差が約半分程度に抑えられる結果となった。

④ KLAU PPK システム搭載 Inspire2 による測量

KLAU PPK システム搭載の Inspire2 を用いて、高知港防波堤 (東第一) を対象に測量を実施した (図-2.5.9)。なお、配信会社からのサービスを介して標高データを修正する場合、例えば標高ではなく楕円体高が出力されるなど、必要に応じて解析者側でデータの変換が必要となる場合があるので注意を要する。高知港防波堤 (東第一) では、精度検証用に防波堤上の 10 点を対象に RTK-GNSS 受信機を使用して GCP 測量を行って参照データとし、PPK システムを介した写真測量による各三次元点群データ (DEM) の精度を検証した。GCP 測量値との誤差 (図-2.5.10) を見ると、本測量手法で最大誤差は 0.089m であった。絶対値平均では Phantom4 RTK で 0.008m, KLAU PPK システムで 0.033m であり両手法に大きな差は見られず、ともに高い精度を得た。表-2.5.2 場所ごとの計測精度の一覧を示す。

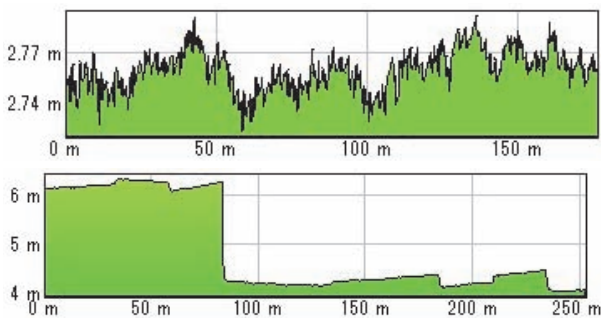


図-2.5.6 Phantom4 RTK による計測断面図
(上 : 護岸・下 : 防波堤 (南))

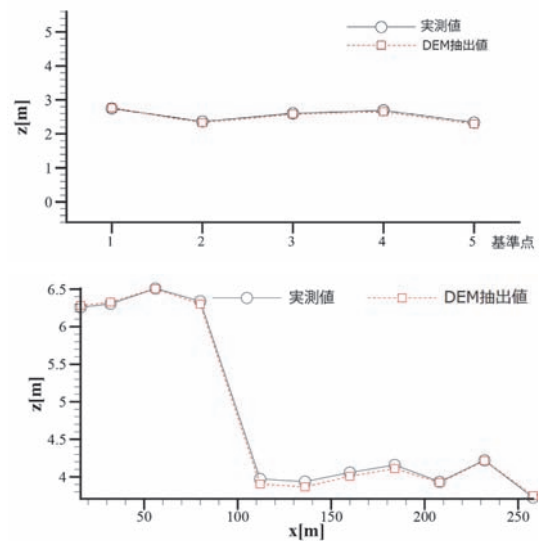


図-2.5.7 Phantom4 RTK (モデル抽出値) と GCP 実測値による標高値 (上 : 護岸, 下 : 防波堤 (南))

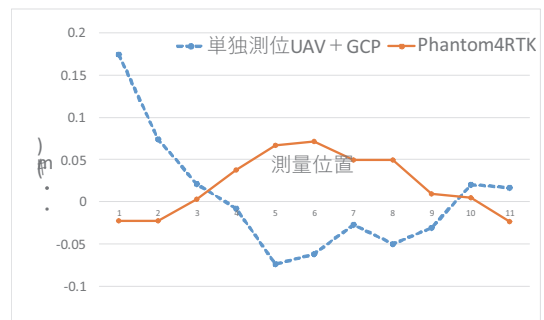


図-2.5.8 計測方法による検証点での誤差 (高知港防波堤 (南))



図-2.5.9 オルソ画像 (高知港防波堤 (東第一))

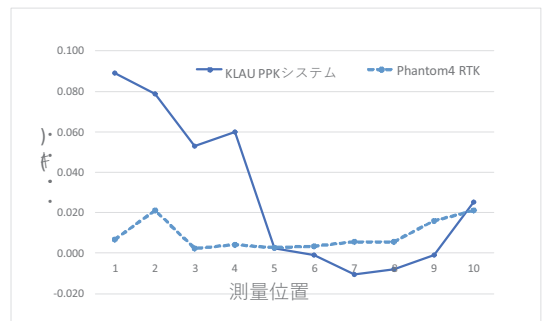


図-2.5.10 計測方法による検証点での誤差 (防波堤 (東第一))

2.6 まとめ

本研究では、護岸や台風発生直後にGCPの取得が困難な島防波堤を対象にUAVを用いた三次元測量を実施した。実験では、複数の計測システムすなわち、単独測位型UAV、GCP補正、RTK-GNSS搭載型UAV、PPK-GNSS搭載型UAVを用いて、それらの計測精度を比較した。その結果以下の事が明らかとなった。

単独測位UAVでは、護岸と防波堤ともに標高誤差が顕著であり、最大30mの誤差が確認された。一方、適切なGCP補正が実施可能な条件下では、最大誤差0.174mと測量精度が大きく向上した。RTK-GNSS搭載型UAVおよびPPK-GNSS搭載型UAVでは、対象とした島防波堤においてそれぞれ2.1cm、8.9cmの絶対平均誤差が示され、最大誤差でも10cm以下に収まる結果となった。GCPによる追加計測・補正を用いずして、高い測量精度を保てる事が明らかとなった。

例えば島防波堤のように、従来ではGCP計測のために船による上陸が必要であった構造物についても、これらのUAV測量手法を用いれば、上陸の手間を省いて高精度に測量が可能となる事が示唆される。

表-2.5.2 測量精度一覧

| 施設 | 計測手法 | 検証 点数 | 最大誤差 (m) | 絶対値平 均 (m) |
|--------------|------|----------|-------------|---------------|
| 護岸 | GCP | 10 | 0.13 | 0.076 |
| | RTK | 10 | 0.07 | 0.027 |
| 防波堤 (南) | GCP | 11 | 0.174 | 0.033 |
| | RTK | 11 | 0.024 | 0.033 |
| 防波堤 (東第一) | RTK | 10 | 0.021 | 0.008 |
| | PPK | 10 | 0.089 | 0.033 |

3 被災調査におけるUAV活用事例

2018年台風21号による近畿地方の災害のように浸水被害が広範囲に渡る場合、現実的には調査時間の制限から、GCP測量などを通じて定量的な浸水深や浸水高を網羅することは困難を極める。そのため、UAVを活用して従来の調査方法と連携させる等による測量方法の改善が求められている。

本研究では、2017年台風21号で浸水した地区をUAV (Phantom3 Pro) により撮影し、その画像とRTK-GNSS受信機を搭載したUAV (Phantom4 RTK) による測量と比較することで、浸水深等の定量的なデータの取得可能性を明らかにすることとした。加えて、2018年台風21号による被災調査事例を通して、時間の限られた実際の調査現場において、UAVをどのように運用できるかについて示すこととした。



図-3.1.1 台風 1721 号進路

3.1 台風1721号被災調査：浸水深の網羅的取得

2017年10月16日にカロリン諸島で発生した台風1721号は10月23日午前3時頃、静岡県御前崎市付近に上陸した。台風1721号は関東地方を通過し東北沖へ抜け、23日9時に福島県沖で温帯低気圧に変化した。なお、東京都三宅村では、最大風速35.5m/sを観測している。図-3.1.1に、台風1721号の進路を示す。各地で浸水被害が発生し、神奈川県横須賀市の港湾空港技術研究所（以下研究所）でも台風による浸水が発生した。その際の波浪状況を午前6時頃に地上から撮影をし、午前9時頃にUAVによって上空から撮影を実施した。用いたUAVは表3.1.1に示すPhantom3である。

写真-3.1.1は研究所にて撮影した台風1721号の波浪の様子である。護岸・パラペットの越波状況が把握できる。午前6時15分ごろ撮影の写真は潮位がパラペット付近まで達していることが分かる。

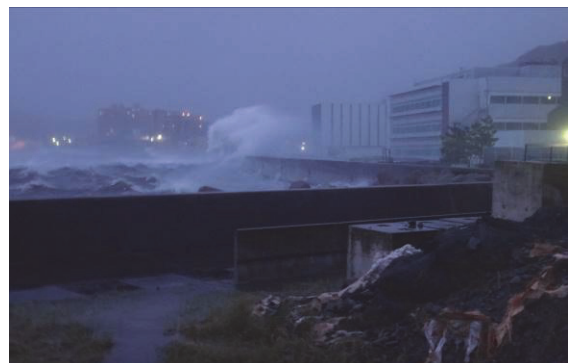
写真-3.1.2に、UAVを用いて撮影した台風通過後の研究所付近における波浪状況を示す。写真からは、波が護岸に打ち付けて越波する様子が確認出来る。特に写真-3.1.2F及びGからは、護岸越波後の水塊が陸上を流れる状況も把握が出来る。このように、波が高くなることで従来では護岸に近づけないような危険な状況下においても、UAVを用いることで波の状況を示す映像・写真の収集が可能となる。



午前 6 時 15 分頃撮影



午前 6 時頃撮影



午前 6 時半頃撮影

写真-3.1.1 台風 1721 号波浪写真（研究所）

表 3.1.1 Phantom3 Pro 仕様

| Phantom3 Pro | |
|--------------|-------|
| 重量 | 1280g |
| 最大上昇速度 | 5m/s |
| 最大下降速度 | 3m/s |
| 最大速度 | 16m/s |
| 最大飛行時間 | 23分 |



A



B



C



D



E



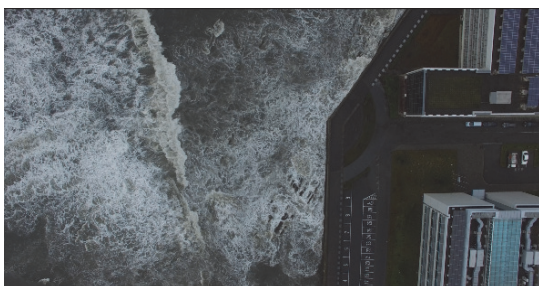
F



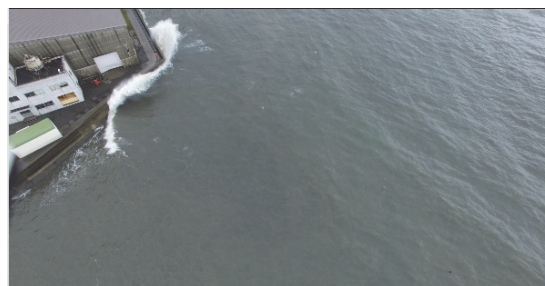
G



H



I



J

写真-3.1.2 台風 1721 号波浪写真 (UAV)



午前 5 時半ごろ撮影



午前 7 時半ごろ撮影



午前 7 時半ごろ撮影



午前 8 時ごろ撮影

写真-3.1.3(1) 台風 1721 号被災写真

写真-3.1.3 は、午前 5 時頃、7 時半頃、8 時頃、9 時頃における研究所構内での浸水状況の撮影写真である。写真から、午前 7 時半頃の時点で、護岸を越波した海水により構内の浸水が進行する様子が確認出来る。この時点で、大量の漂流物が構内に存在していることが分かるが、午前 9 時頃になると浸水は収まり、各所で上記漂流物が堆積する。特に、浸水範囲の端部において漂流物が堆積していることが撮影写真との比較から確認でき、浸水範囲が把握出来る。なお、これら写真は、測量用の設定で撮影されたものではなかったため、後日に適切な設定の基、RTK-GNSS 搭載型 UAV (表-3.1.2) を用いて、研究所構内の写真を改めて撮影し直した。撮影写真から、DEM (数値標高モデル) を作成し、台風による浸水範囲・浸水高を推定した。まず、台風直後に行った UAV による撮影写真によって、浸水高推定の鍵となる漂流物の堆積を 8 か所で見つけた (図-3.1.2 ~9 参照)。これら地点を対象に、後日に取得した写真測量からの三次元点群データとそれらに紐付けられた標高値を照合して、各地点での浸水高を推定した (図-3.1.10)。これらの値から台風による構内の浸水高を T.P2.6m と定義し、この値を基準にして DEM (数値標高モデル) にハッチングを施して構内の浸水分布図を作成した。図-3.1.11 では Phantom4 RTK による測量結果から得られた DEM を、図-3.1.12 では Phantom4 pro と GCP による測量結果から得られた DEM をそれぞれ用いて浸水分布を示した。浸水の



午前 9 時ごろ UAV 撮影

写真-3.1.3(2) 台風 1721 号被災写真

表-3.1.2 撮影諸元

| | 撮影枚数 | 撮影時間 (分) | 解析時間 (分) |
|---------------------|------|-------------|-------------|
| Phantom4 RTK | 738 | 60 | 290 |
| Phantom4 Pro+GCP | 635 | 40 | 240 |

推定範囲は図-3.1.11 と図-3.1.12 の両者において大きな差異は見られなかったものの、例えば図-3.1.10 中の地点⑧などで浸水判定の違いすなわち標高の推定値に若干の差が見られた。これは当該地点における植生が影響したものと考えられ、写真測量の際には植生が確認出来る箇所において十分な注意が必要であることが分かる。



图-3.1.2 地点①：台风 1721 号推定浸水高 2.6m



图-3.1.3 地点②：2017 年台风 21 号推定浸水高 2.5~2.6m

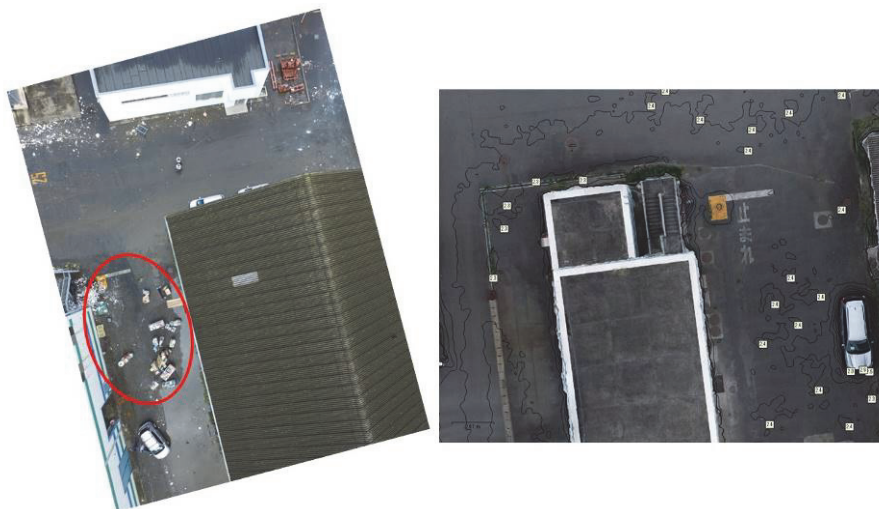


图-3.1.4 地点③：2017 年台风 21 号推定浸水高 2.4m



图-3.1.5 地点④：2017年台风 21 号推定浸水高 2.6m

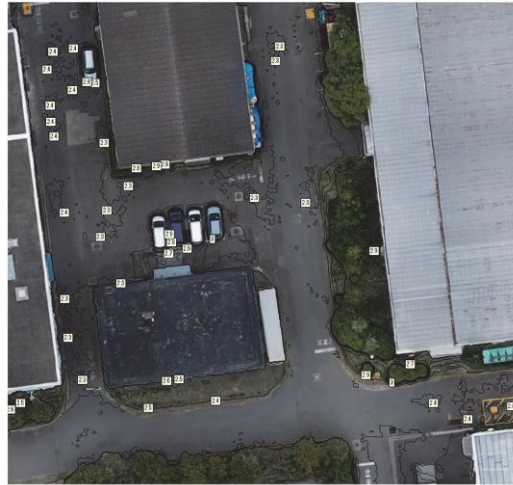


图-3.1.6 地点⑤：台风 1721 号推定浸水高 2.5~2.6m



图-3.1.7 地点⑥：台风 1721 号推定浸水高 2.5~2.6m



図-3.1.8 地点⑦：台風 1721 号推定浸水高 2.4~2.6m



図-3.1.9 地点⑧：台風 1721 号推定浸水高 2.6m

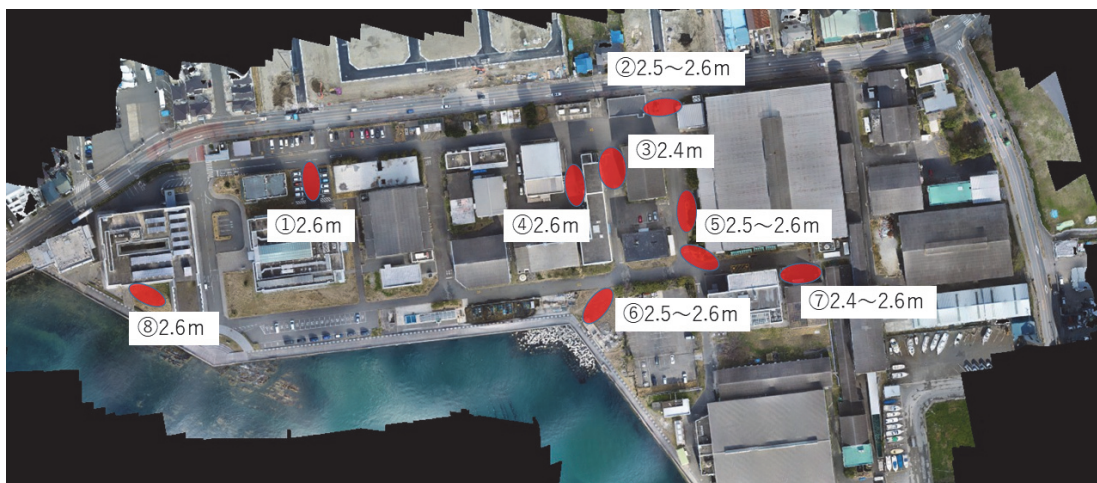


図-3.1.10 台風 1721 号推定浸水高まとめ (Phantom4 RTK 使用)
(各地点番号は、図-3.1.2~9 と同一)

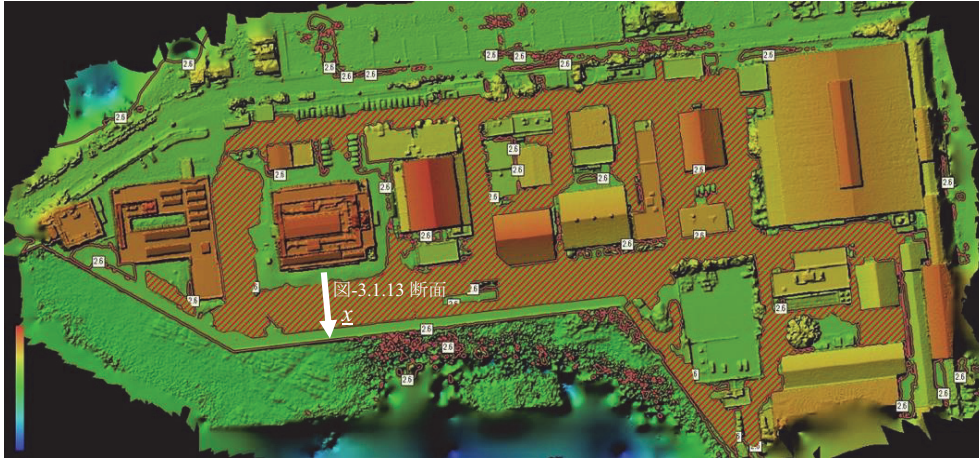


図-3.1.11 台風1721号推定浸水範囲（Phantom4 RTK 使用）2019年4月17日撮影

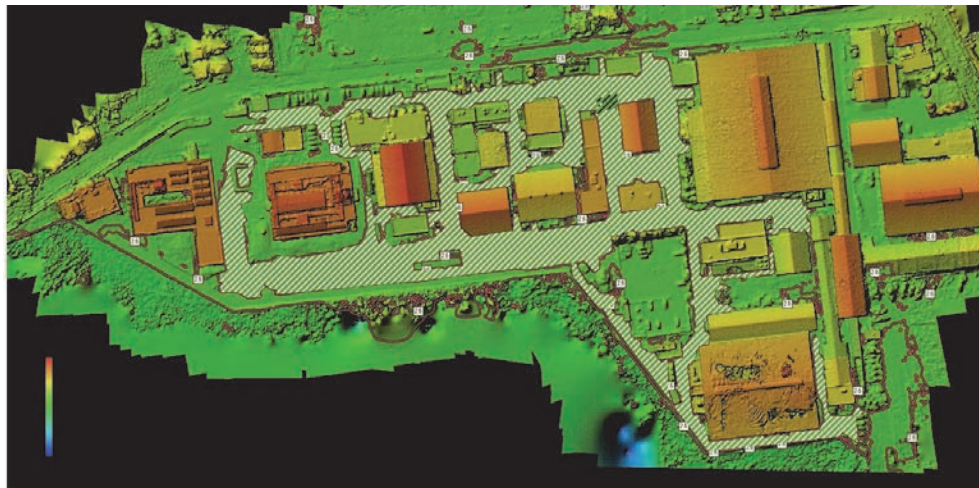


図-3.1.12 台風1721号推定浸水範囲（Phantom4+GCP 使用）2018年12月28日撮影

次に、本写真測量から得られた図-3.1.11 を用いて、特定断面（図-3.1.11 内黒線部分）を対象に断面図を作成し、浸水深の推定を行った。図-3.1.13 に、対象の断面図を示す。図から、研究所構内での浸水深は約30cmであったことが分かった。

以上のように UAV を用いた写真測量により浸水跡の調査と浸水範囲・浸水深の推定が比較的短時間で広範囲に、また網羅的に実施できることが示された。

3.2 台風1821号被災調査

2018年8月28日台風1821号がマーシャル諸島近海で発生、9月4日に徳島県南部、兵庫県神戸市付近に上陸した。台風1821号は、9月5日午前9時に間宮海峡にて温帯低気圧に変わった。図-3.2.1に台風1821号の進路を示す。この台風では、関空島にて最大瞬間風速58.1m/sを観測し、神戸市の各所において高潮・高波・強風による被害が生じた。この災害発生後の被災調査では、UAV（Phantom4 Pro）を使用した写

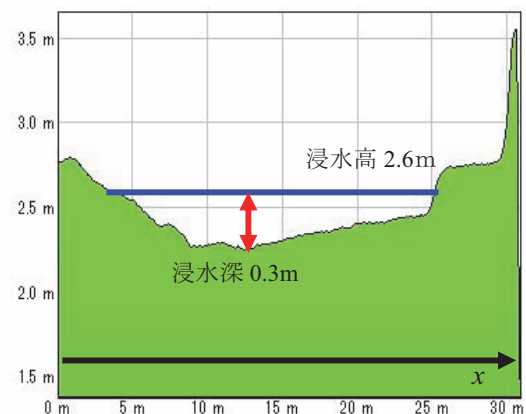


図-3.1.13 構内断面図

真撮影及び地上からの浸水痕跡調査と各地点のGCP測量から高潮の浸水深を調査した。図-3.2.2に、9月8日に実施した六甲アイランドでの浸水調査において、各地点で発見した痕跡から得られた浸水深と同地点でのGCP測量から得ら

れた浸水高を示す。なお、図中のR付きの数字は遡上高さを示す。また、UAVを用いて撮影した六甲ターミナルの東側コンテナヤードの写真を写真-3.2.1に、西側コンテナヤードの写真を写真-3.2.2に示す。本撮影は台風通過後の翌日9月5日午前の時点において実施したものである。

台風通過から3日後に実施した9月8日の浸水調査では、9月6日の調査時と比較して、街の全域に渡って片付け・清掃が進んでいたため浸水の痕跡が短期間で大きく減っていた。また、コンテナターミナルでは荷役が再開していたことから、ターミナル内での浸水調査は危険を伴うため、9月6日以降では実施していない。同理由から、UAVによるターミナル内の空撮は9月6日にのみ実施ができた。本調査に限らず、一般的な台風後の浸水調査においても、ターミナルの再稼働を考慮すれば、UAVによる空撮・写真測量は、再稼働前の初動調査での実施を前提にすべきものと思われる。また、一般的にそうした初動調査では、全体の状況把握が優先されるために調査範囲が広大になることが多く、調査時間の制限からターミナル内の広い範囲において各地点で直接測量を実施して浸水高を網羅していくことは困難を極める。したがって、初動調査時にRTK-GNSSシステム等を搭載した高精度なUAVを用いて写真測量を実施することが理想的であろう。なお、コンテナターミナルでUAVによる調査を実施する場合には、各関係省庁への手続きに加えて、現地の民間利用者の許可が必要となるので注意が必要である。特に被害が小さい場合には、荷役が稼働状況にあるこ

とが多く、その場合にはUAVでの調査は難しくなるものと考えられる。

なお、本調査では単独測位型のGNSSシステムを搭載したUAVを用いて調査を実施している。写真-3.2.1及び写真-3.2.2から、コンテナに着目すると、東側コンテナヤードが西側コンテナヤードと比較してコンテナの散乱が大きいことが分かる。また、一部のトランスファークレーンがレールから脱線しているのが確認出来る。地上からの調査では、コンテナの移動状況の把握が難しかったが、空撮写真からどのエリアがどの程度被災を受けているか迅速に把握出来る。こうしたUAVを用いた初動調査において、写真測

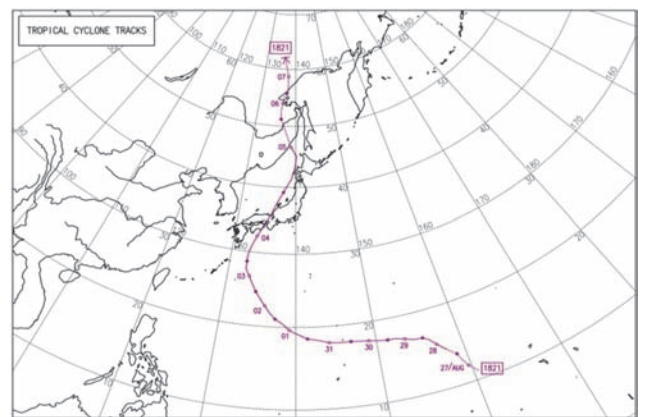


図-3.2.1 台風1821号進路（気象庁HPより：

https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/route_map/bstv2018.html）



図-3.2.2 台風1821号浸水高調査（括弧内の数字は浸水深）

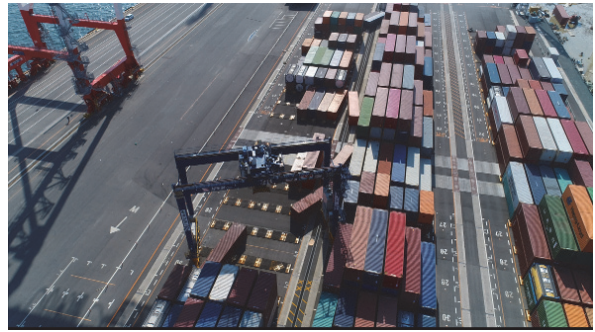
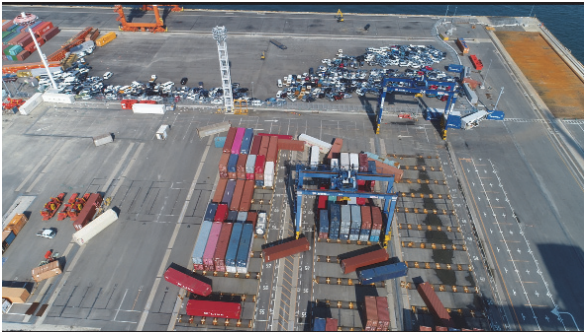


写真-3.2.1 台風 1821 号被災調査写真 (UAV 撮影) 六甲ターミナル東側



写真-3.2.2 台風 1821 号被災調査写真 (UAV 撮影) 六甲ターミナル西側

量を前提としたRTK-GNSSシステム等を搭載した高精度な UAV を用いれば、前節のように浸水域や凡その浸水高・浸水深の定量的評価の実施も同時に可能となる。現地では、地盤沈下などにより地盤高が公称値と計測値で異なる場合があるため、被災状況とその原因の把握のためにも、そう

した現地での地盤高や浸水高の測量は重要となる。

写真-3.2.3 は、台風通過後 9 月 6 日に実施した陸上からの被災調査の様子である。写真-3.2.3(B) では高潮・高波により岸に船が乗り上げ車両が流されていることが分かるが、写真-3.2.4 に示す通り、UAV による撮影では撮影方向・



(A)六甲ターミナル西側：コンテナの炎上



(B)西宮市：台船の乗り上げ



(C)六甲アイランド：浸水高の測量



(D)神戸市：浸水深の測量

写真-3.2.3 台風1821号被災調査写真（地上撮影）

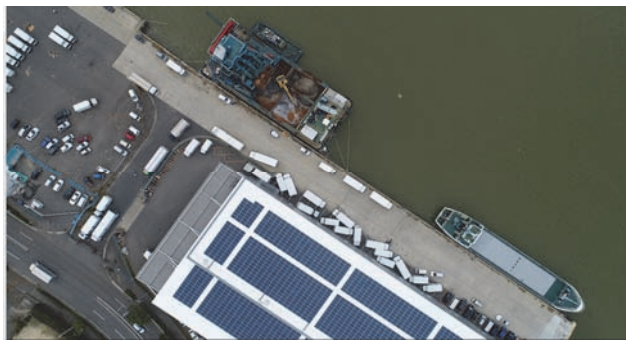


写真-3.2.4 台風1821号被災調査写真（UAV撮影）
西宮市付近

角度の選択に自由度が増すため、状況把握がより容易となる。

4 まとめ

本研究では、護岸やGCPの取得が困難な島防波堤を対象にUAVを用いた三次元測量を実施した。実験では、複数の計測システムすなわち単独測位UAV, GCP補正, RTK-GNSS搭載型機体, PPK-GNSS搭載型機体を用いて、それらの計測精度を比較した。その結果、以下の事が明らかになった。

(1) 単独測位UAVでは、護岸と防波堤ともに標高誤差が顕著であり、最大30m程度の誤差が確認された。一方、適切なGCP補正が実施可能な条件下では、測量結果が劇的に向上し、最大誤差は0.173mに収まった。次に、RTK-GNSS搭載型UAVおよびPPK-GNSS搭載型UAVでは、島防波堤での写真測量において、測量誤差が最大でそれぞれ2.4 cm, 8.9cmに収まり、測量精度が高いことが明らかとなった。また、RTK-GNSS搭載型UAVおよびPPK-GNSS搭載型UAVでは、基準点であるGCPを必要とせず、島防波堤のようにGCP取得に船で上陸するなど、台風直後のアクセスが困難となる構造物に対して、迅速かつ容易に測量が出来ることが確かめられた。

(2) 台風1721号で浸水した港湾空港技術研究所構内を対象に、UAVによる写真測量から浸水高・浸水深及び浸水範囲の推定を実施し、UAVの写真測量の現場適用を試みた。撮影写真に残された痕跡から浸水高が標高2.6mで浸水深が最大0.3mであった事が明らかとなった。また、写真測量により得られたDEMを利用することで、これまでは困難であった高潮・高波時の浸水域の面的な把握を実施し、地盤高の測量から浸水深の推定値も同時に得ることが出来た。被災後の調査時点では、地盤沈下などにより公称の地盤高と実際の地盤高が異なる場合があるため、こうしたUAVによる浸水高及び地盤高の把握は、被災状況の把握や原因究明のための重要事項の一つに挙げられる。

(3) 台風1821号で浸水した六甲ターミナル及び西宮市の市街地を対象に、UAVを用いた測量調査を実施し、現場でのUAV活用における留意点を整理した。一連の調査結果から、コンテナターミナルでは、初動調査による迅速な写真測量が広域な浸水域の定量評価の鍵となることが分かった。今後、(2)で検討したRTK-GNSS搭載型UAVにより、定量的な浸水高（浸水深）を広範囲に計測する事が期待される。

謝辞

本研究の一部は、国土交通省総合政策局『交通運輸技術開発推進制度：海洋分野の点検におけるドローン技術活用に関する研究』の助成を受けて実施した。高知港の調査では、国土交通省四国地方整備局のみなさまから多大な御協力と御支援を頂いた。同調査では、ブルーイノベーション株式会社の酒井和也様より多くの御助言と御協力を頂いた。神戸市での調査では、国土交通省近畿地方整備局のみなさまに御協力を頂いた。指宿港海岸における調査では、九州地方整備局からの御支援を頂いた。また、UAVによる調査全般に関して、港湾空港技術研究所の桑江朝比呂沿岸環境グループ長より多くの御助言を頂いた。ここに感謝の意を表する。

(2019年8月9日受付)

参考文献

- 川口真吾・鶴田 修己・高坂 雄一・岡崎 裕・朝比翔太・酒井和也・鈴木高二朗 (2019) : UAVを用いた港湾構造物の計測技術に関する検討, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol.75, No.2, pp.I_121-I_126.
- 川口真吾・鈴木高二朗・鶴田 修己 (2019) : RTK-GNSS受信機を搭載したUAVによる浸水データの測量に関する研究, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 75, No.2, pp. I_1297-I_1302.
- 神野有生・宮崎真弘・八田滉平・福本和真 (2018) : UAV写真測量のSfMにおける斜め撮影導入に関する基礎的シミュレーション, 日本写真測量学会秋季学術講演会.
- 国土交通省港湾局 (2014) : 港湾の施設の点検診断ガイドライン, 2018年改訂.
- 国土交通省国土地理院 (2016) : UAV を用いた公共測量マニュアル (案), 2017年改訂.
- 鈴木高二朗・川口真吾・雪丸敏昭・中野史丈・鶴田修己・岡田克寛 (2018) : 赤外線カメラ搭載ドローンによる指宿港海岸周辺の熱分布観測, 土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), Vol.73.
- 早坂寿人・大野祐幸・大塚力・関谷洋史・瀧繁幸 (2015) : UAVによる空撮写真を用いた三次元モデリングソフトウェアの精度検証, 国土地理院技術資料, A5-No.127, pp.107-116.

付録1 赤外線カメラ搭載UAVによる調査

(1) 調査概要

指宿港海岸はその砂浜から温泉が湧出する世界でも特異な海岸である。その温泉水を上空から赤外線カメラ搭載のUAVによって撮影を実施し、面的な温泉の湧出状況や周囲の護岸や水域の温度分布を明らかできるか検討を行った。

(2) 使用機器

使用したUAVはDJI社製のInspire1 (写真-付録1.1) であり、表-付録1.1に示す性能を有している。このInspire1にFLIR社製の赤外線カメラ (ZemuseXTR; 表-付録1.2参照) を搭載した。



写真-付録1.1 DJI社製 Inspire1

表-付録1.1 Inspire1仕様

| Inspire1 | |
|-------------------|--------|
| 重量 (本体のみ) | 2,845g |
| 最大上昇速度 | 5m/s |
| 最大下降速度 | 4m/s |
| 最大速度 | 22m/s |
| 最大飛行時間 (バッテリーT47) | 17分 |
| 最大飛行時間 (バッテリーT48) | 21分 |

表-付録1.2 赤外線カメラ仕様

| ZemuseXT64xxR (赤外線カメラ) | |
|------------------------|--------------|
| 素子数 | 640×512 |
| 画角 | 32×26°(19mm) |

(3) 観測結果

(3-1) 可視光カメラによる撮影

図-付録1.1は可視光カメラによって撮影された映像をMetashape (旧PhotoScan) によって合成し、オルソ画像としたものである。画像は高さ約50mから撮影しており、2064枚の画像を合成した。離岸堤や突堤が確認されるほか、温泉が湧出する南側の砂浜も撮影されている。

(3-2) 赤外線カメラによる撮影

図-付録1.2は赤外線カメラによって撮影した映像を合成したものである。海岸南側の砂浜では1月16日、それ以外の場所は1月17日の干潮時近くに撮影した。温度の精度を確認するため、別途、温度計で地面の温度を計測した。

図-付録1.3は海岸南側の砂浜の拡大図である。デジタル温度計によって計測された温度は62.1℃、赤外線画像での計測結果は61.4℃であり、UAVと赤外線カメラを用いた撮影

により温度を精度良く計測できることが明らかとなった。図中、砂浜からは筋のようにして温泉水が砂浜から湧出している状況が分かる他、汀線付近の温度が最も高く、湧出した温泉水が海表面で拡散していく状況が分かる。

図-付録1.4は②放水路からの温泉水の放流状況であるが、温泉水と海水が混ざり合う状況が確認できる。放水路からの温泉水は、南砂浜で湧出しているものと比較すると温度が低いため、上流からの河川水が温泉水と混ざりあっている可能性が考えられる。

(4) まとめ

本研究では、UAVと赤外線カメラの組み合わせにより、指宿港海岸の砂浜からの温泉の湧出現象や護岸の温度分布を精度良く計測できることが明らかとなった。本観測方法により、今後、温泉の湧出現象や護岸の舗装性状の変化を広範囲かつ迅速に明らかとすることが出来るものと考えられる。

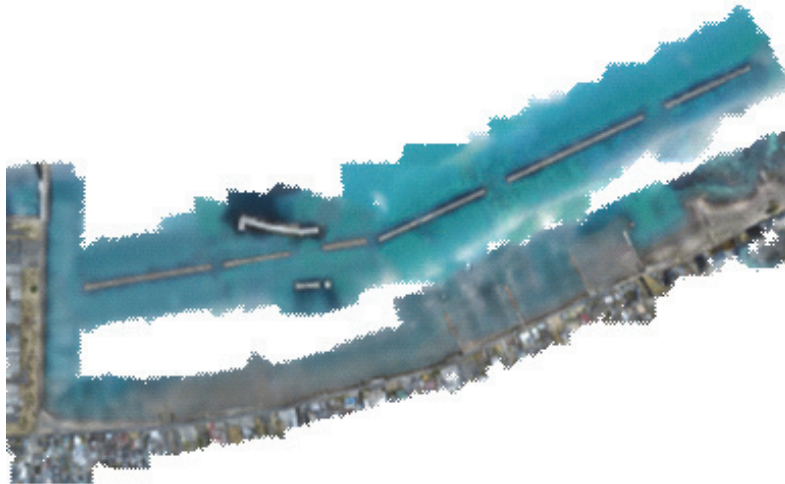


図-付録 1.1 指宿港海岸全域

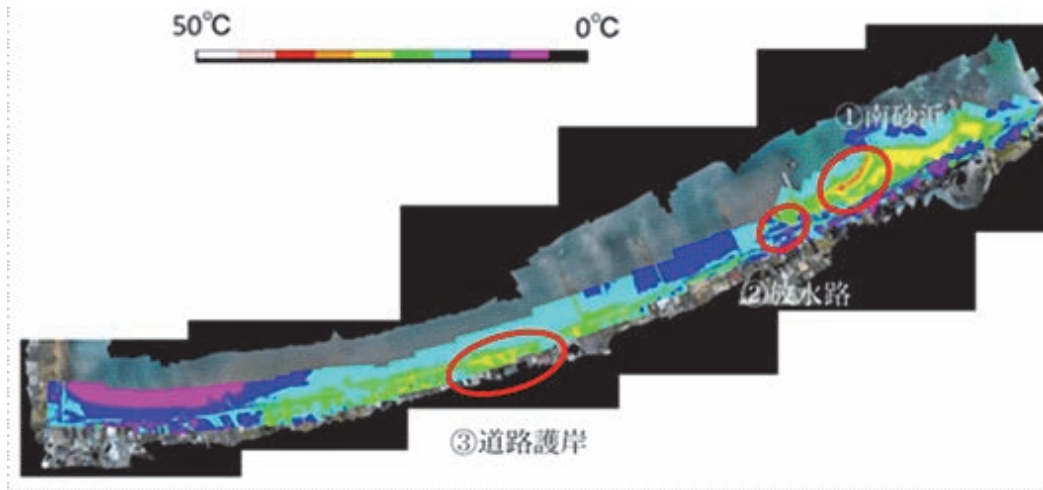


図-付録 1.2 指宿港海岸赤外線画像全体図

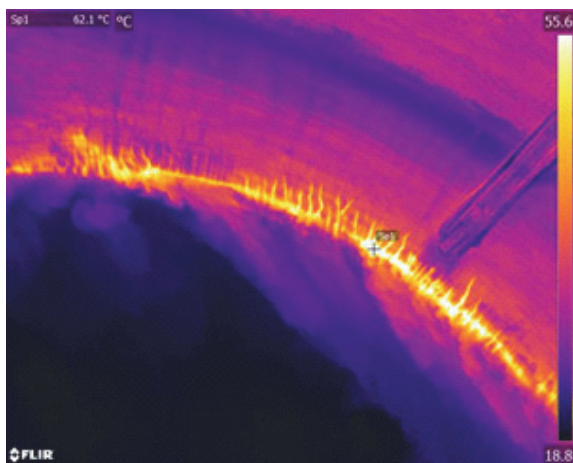


図-付録 1.3 南砂浜①赤外線画像

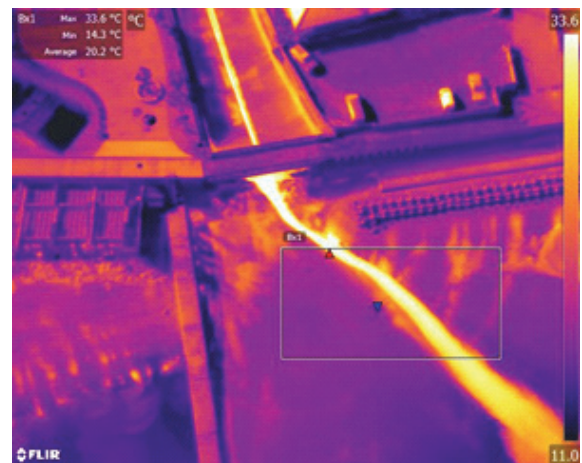


図-付録 1.4 放水路②からの温泉水の放流状況

港湾空港技術研究所資料 No.1360

2019. 11

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2019) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています